

PENGARUH PERLAKUAN PANAS TERHADAP LAJU PERAMBATAN RETAK FATIK BAJA TAHAN KARAT AISI 304

Jamasri^{*)}

ABSTRACT

The effect of a local heating due to a joint weld on the fatigue crack growth of the stainless steel AISI 304 has been investigated. The test was performed in a room temperature condition with a constant load amplitude and the load ratio was maintained to be 0.3. The load frequency was adjusted from 5 to 15 Hz depending on the performance of the testing machine used.

Center cracked specimens were used in this research and the initial crack was introduced by using EDM (Electro Discharge Machining). Those specimens were subsequently tested on the Shimadzu closed loop servo hydraulic testing machine and the increment of the crack length was monitored using two traveling microscopes.

The results show that the effect of the local heating around the cracktip can reasonably increase, whereas the annealing process can decrease the fatigue crack growth rates. The observation on the microstructures shows that the size of crystal grains increase significantly after the annealing process.

LATAR BELAKANG

Dalam konteks kerekayasaan, fatik adalah suatu proses merambatnya retak akibat terjadinya pembebanan berulang. Perambatan retak fatik dapat terjadi pada setiap struktur dan biasanya terjadi secara tiba-tiba. Besarnya beban yang menyebabkan terjadinya retak fatik dalam suatu komponen biasanya jauh lebih kecil dibanding dengan kekuatan statiknya dan bahkan jauh lebih kecil dari tegangan statik diijinkan. Oleh karena itu dalam perancangan suatu struktur harus diketahui terlebih dahulu jenis pembebanan yang akan terjadi pada komponen tersebut.

Jika suatu komponen atau struktur mengalami pembebanan berfluktuasi selama beroperasi, kegagalan fatik merupakan faktor utama untuk menentukan batas tegangan perancangan. Hal ini terutama pada komponen yang disambung dengan proses pengelasan (Maddox, 1991), karena kekuatan fatiknya jauh lebih kecil daripada konstruksi tanpa las. Perlu diketahui juga bahwa kegagalan fatik pada sambungan las dapat terjadi pada kondisi pembebanan tekan.

Pelat baja tahan karat AISI 304 merupakan salah satu pelat baja yang banyak digunakan pada konstruksi mesin terutama yang beroperasi pada tempat-tempat yang relatif korosif, seperti pada pabrik pupuk, pabrik pengilangan minyak dan lain-lain. Proses penyambungan pada pelat ini juga dilakukan dengan proses pengelasan, sehingga masalah yang dihadapi terhadap terjadinya retak dan perambatan

retak fatik juga sama. Namun karena pelat baja tahan karat AISI 304 ini mempunyai sifat sangat ulet, maka ketangguhan dan karakteristik perambatan retak fatiknya akan lebih baik dibanding dengan pelat baja karbon secara umum.

Untuk mengetahui ketahanan retak yang biasa disebut dengan faktor intensitas tegangan kritis, Irwin (1957) menurunkan suatu persamaan pada suatu kasus retak yang terletak di tengah pelat tak berhingga dengan pendekatan teori elastisitas. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa faktor intensitas tegangan kritis berbanding langsung dengan tegangan kritis dan akar dari setengah panjang retak. Kasus serupa juga telah disampaikan oleh (Sih, 1965) dan (Gross, 1964), dimana Sih menggunakan pendekatan persamaan integral singular sedangkan Gross menggunakan metoda *boundary collocation*. Berhubung penyelesaian kasus di atas mengasumsikan bahwa plastisitas tidak terjadi di ujung retak, maka pendekatan ini disebut dengan mekanika perpatahan elastis linier.

Teori mekanika perpatahan elastis linear juga telah diaplikasikan pada sambungan las, misalnya pengujian faktor intensitas tegangan kritis terhadap spesimen bertakik yang mengalami beban kejut dan suhu bervariasi (Shoemaker, 1969 dan Hodgson, 1958). Hasil pengujian menunjukkan bahwa retak cenderung patah getas terhadap suhu rendah dengan ketahanan retak relatif rendah. Faktor intensitas tegangan kritis pada retak yang terbentuk pada sambungan las sebagai akibat kurangnya penetrasi selama proses pengelasan juga telah diteliti (Jamasri,

^{*)} Ir. Jamasri, Ph.D., Dosen Jurusan Teknik Mesin FT UGM

1995). Hasil penelitian menunjukkan bahwa besar faktor intensitas tegangan kritis tergantung pada geometri pelat yang disambung dan pola pembebanan yang ada.

Penelitian pada sambungan las terhadap sifat fatik telah banyak dilakukan. Miki et al. (1994) telah melakukan uji fatik terhadap sambungan las yang mempunyai kecenderungan menimbulkan konsentrasi tegangan tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan fatik pada sambungan yang mempunyai cacat besarnya sama atau lebih tinggi dari pada sambungan yang tidak mempunyai cacat. Hal ini disebabkan oleh dominasi konsentrasi tegangan pada geometri sambungan yang lebih besar dibanding dengan konsentrasi tegangan pada cacat. Rangkuman tentang penelitian serupa telah dilakukan oleh Reemsnyder (1978) terhadap baja struktur baik berbentuk pelat maupun pipa yang mengalami beban aksial. Hasil observasi menunjukkan bahwa karakteristik fatik terhadap sambungan las dipengaruhi oleh takik, tegangan sisa dan sifat-sifat mekanik bahan dasar.

Pengaruh tegangan sisa akibat sambungan las juga telah diteliti secara eksperimental oleh Fukuda et al. (1979) terhadap baja kekuatan tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik laju perambatan retak fatik dipengaruhi oleh perbandingan tegangan, tetapi dengan jarak yang sangat dekat. Sandifer et al. (1978) meneliti laju perambatan retak fatik dengan cara membuat *compact tension specimen* (CTS), dengan menempatkan retak tiruan masing-masing bertepatan dengan sambungan las, daerah *heat affected zone* (HAZ) dan daerah netral. Ternyata dengan kualitas pengelasan yang baik, ketahanan laju perambatan retak fatik tidak turun akibat adanya sambungan las.

LANDASAN TEORI

Faktor intensitas tegangan pada pembebanan tarik (mode I) untuk pelat tak berhingga telah diturunkan oleh Irwin (1957) sebagai berikut :

$$K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \quad 1)$$

Untuk retak pelat berhingga persamaan (6) menjadi :

$$K_I = Y_I \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \quad 2)$$

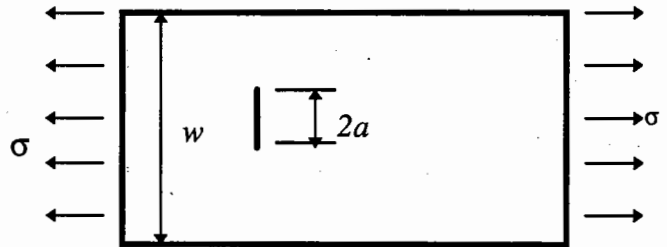
dengan Y_I adalah faktor koreksi terhadap geometri benda uji, untuk spesimen seperti pada gambar 1 dapat ditentukan dengan perumusan sebagai berikut :

$$Y_I = \left(\frac{w}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{w} \right)^{1/2} \quad 3)$$

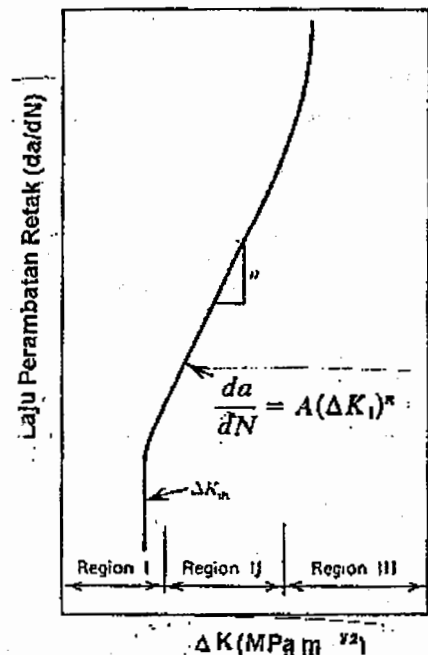
Dari persamaan (2), dapat diturunkan persamaan fluktuasi faktor intensitas tegangan sebagai berikut (Fedderson, 1967):

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \left(\frac{w}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{w} \right)^{1/2} \quad 4)$$

dengan $\Delta \sigma$ adalah amplitudo tegangan.



Gambar 1. Geometri *center cracked specimen*



Gambar 2. Kurva karakteristik perambatan retak fatik, log da/dN , terhadap log ΔK_I

Secara umum karakteristik perambatan retak fatik untuk bahan metal dapat dibagi menjadi tiga daerah seperti diperlihatkan pada gambar 2 (Barsom, 1972). Daerah I (*region I*) disebut daerah ambang fatik (*fatigue threshold*) yang terjadi pada laju perambatan retak sekitar 10^{-10} m/siklus. Di bawah laju ini tidak terjadi perambatan retak. Daerah II (*region II*) menunjukkan suatu hubungan linier antara log da/dN dan log ΔK_I , sedangkan untuk daerah III (*region III*) laju perambatan retak berlangsung sangat cepat dan sedikit sekali terjadi perambatan retak fatik, biasanya

daerah ini tidak dipertimbangkan dalam perancangan struktur. Daerah ini terutama dikendalikan oleh parameter katangguhan bahan terhadap retak.

Daerah II adalah bagian yang sangat menarik karena walaupun dengan adanya retak, retak tersebut merambat secara linier sehingga masih dipertimbangkan dalam perancangan struktur dan untuk memprediksi umur suatu struktur Paris (1963) mengungkapkan suatu persamaan sebagai berikut:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n \quad 5)$$

Dengan n = koefisien eksponensial
 A = konstanta bahan
 a = panjang retak (m)
 N = jumlah siklus
 ΔK_I = fluktuasi faktor intensitas tegangan dari pers. (4) ($\text{MPa.m}^{1/2}$)

Harga ΔK merupakan selisih faktor intensitas tegangan maksimum dan minimum yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$\Delta K_I = K_{Imaks} - K_{Imin} \quad 6)$$

Biasanya dalam pengujian fatik digunakan variabel perbandingan tegangan atau beban, yaitu :

$$R = \frac{P_{min}}{P_{maks}} \quad 7)$$

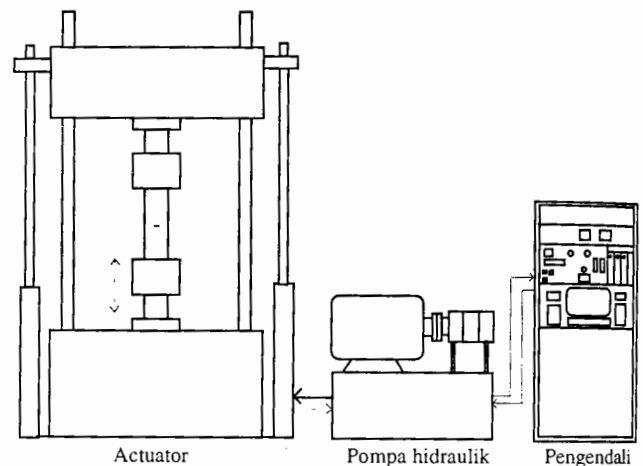
dengan variabel R ini, maka dalam suatu pengujian biasanya hanya diperlukan tambahan variabel tegangan atau beban maksimum.

CARA PENELITIAN

Dalam penelitian ini digunakan pelat ketebalan 3 mm. Pembuatan spesimen dilakukan dengan menggunakan mesin CNC, kecuali pembuatan retaknya dilakukan dengan EDM (*Electro Discharge Machining*). Spesimen-spesimen itu kemudian dikelompokkan menjadi tiga macam kondisi retak, yaitu retak tanpa pengaruh panas, retak dengan simulasi pengelasan, dan retak dengan simulasi pengelasan dilanjutkan dengan perlakuan *annealing*. Sebagai data pendukung, juga dibuat spesimen untuk uji tarik dan struktur mikro.

Spesimen-spesimen uji perambatan retak selanjutnya diuji secara dinamik dengan mesin uji servo hidrolik kontrol tertutup Shimadzu, seperti ditunjukkan pada gambar 4. Pertambahan panjang

retak dimonitor dengan dua buah *traveling microscope* dengan resolusi 0.01 mm. Pola pembebanan yang digunakan adalah sinusoidal dengan frekuensi berkisar antara 5 - 15 Hz dan pada amplitudo beban yang konstan. Perbandingan tegangan (R) diambil 0,3 dan tegangan maksimumnya sepertiga dari tegangan luluh bahan dasar (lihat tabel 1). Data yang perlu diambil untuk menentukan karakteristik laju perambatan retak adalah pertambahan panjang retak dan jumlah siklus pada pertambahan panjang retak tersebut. Dalam penelitian ini, panjang retak dicatat untuk setiap pertambahan 0,25 mm. Spesimen-spesimen yang lain juga diuji sesuai dengan keperluan untuk mendukung data laju perambatan retak.



Gambar 3. Skema mesin uji servo-hidrolik Shimadzu

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Sifat mekanik dan Struktur Mikro

Hasil uji tarik terhadap spesimen bahan dasar dan bahan yang telah dianil ditunjukkan dalam tabel 1. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa dengan perlakuan anil memberikan tegangan luluh dan tegangan maksimum lebih rendah dibanding dengan bahan dasarnya, tetapi perpanjangan dan reduksi penampang melintang lebih besar. Struktur mikro (gambar 4) memperlihatkan bahwa ukuran butir kristal benda uji dianil dibandingkan dengan benda uji tidak dianil. Hal ini disebabkan proses rekristalisasi yang terjadi selama proses pendinginan lambat (proses anil). Karena ukuran butiran benda uji yang dianil lebih besar, maka benda uji tersebut akan lebih ulet dibanding dengan benda uji yang tidak dianil, seperti ditunjukkan pada hasil pengujian tarik.

Tabel 1. Sifat mekanik baja tahan karat AISI 304 pada suhu ruang

Kondisi Spesimen	Tegangan luluh (MPa)	Tegangan Maksimum (MPa)	Prosentase perpanjangan	Prosentase pengurangan luasan
Tidak di-anil	490	637	60	37
di-anil	354	555	72,5	58



5 μ m

a) Bahan sebelum dianil



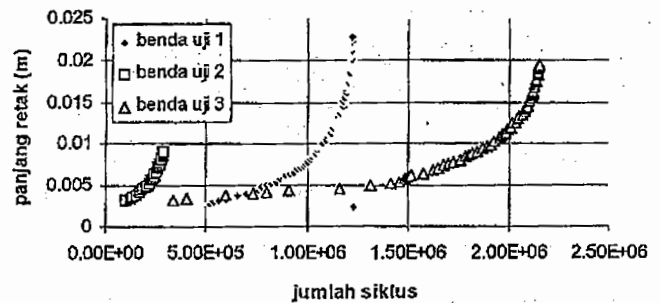
5 μ m

b) Bahan sesudah dianil

Gambar 4. Struktur mikro baja tahan karat AISI 304

Laju Perambatan Retak Fatik

Laju perambatan retak fatik dapat diperoleh dengan mencatat jumlah siklus tiap penambahan retak, dalam penelitian ini diambil berkisar 0,25mm. Untuk mendapatkan data yang lebih akurat, pencatatan dilakukan di kedua sisi retak, lalu panjang retak sisi kiri dan kanan diambil harga reratanya. Dari data ini dapat dibuat kurva hubungan antara penambahan panjang retak dan jumlah siklus, seperti ditunjukkan pada gambar 5.



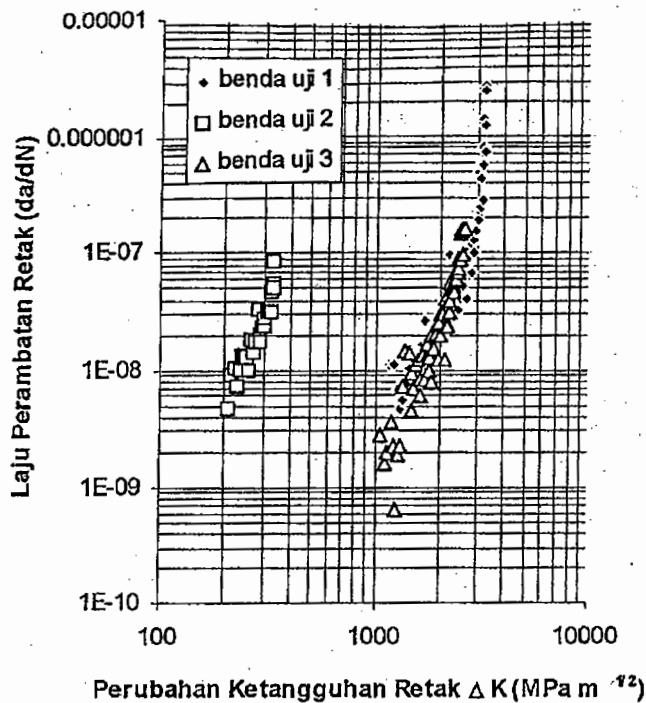
Keterangan:

- Benda uji 1 = benda uji tanpa perlakuan panas
- Benda uji 2 = benda uji dengan pemanasan lokal
- Benda uji 3 = benda uji dengan pemanasan lokal dilanjutkan prosen anil

Gambar 5. Kurva penambahan retak (Δa) terhadap jumlah siklus (N)

Dari gambar tersebut terlihat bahwa akibat adanya pemanasan lokal dapat mempercepat penambahan retak (benda 1), hal ini mungkin dapat disebabkan adanya tegangan sisa yang terjadi selama proses pemanasan lokal. Sedangkan proses perlakuan panas anil dapat memperlambat penambahan retak (benda III), karena butiran kristal menjadi lebih besar dari pada bahan dasarnya. Dari pengujian tarik juga menunjukkan peningkatan keuletan, sehingga penambahan retak menurun.

Dari hasil pengujian perambatan retak juga dapat dibuat kurva laju perambatan retak (da/dN) terhadap perubahan faktor intensitas tegangan (ΔK), seperti ditunjukkan pada gambar 6. Dari kurva ini dapat ditentukan konstanta A dan koefisien n dari persamaan Paris, dan hasilnya seperti ditunjukkan pada tabel 2. Dengan menggunakan persamaan Paris (pers. 5), harga-harga ini selanjutnya dapat digunakan untuk memprediksi umur sebuah komponen jika kondisi tegangan kerja dan panjang retak diketahui.



Gambar 6. Kurva laju perambatan retak (da/dN) terhadap perubahan faktor intensitas tegangan (ΔK)

Tabel 2. Harga A dan n baja tahan karat AISI 304^{*}

Jenis perlakuan	Harga A	Harga n
Bahan dasar tanpa perlakuan	$3,467 \times 10^{-10}$	3,621
Perlakuan pemanasan lokal	$4,229 \times 10^{-11}$	4,899
Perlakuan pemanasan anil	$1,430 \times 10^{-10}$	4,322

^{*}harga ini diperoleh berdasarkan pada da/dN dalam m/siklus dan ΔK dalam M.Pa.m^{1/2}

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Pemanasan lokal pada baja tahan karat AISI 304 tidak mempengaruhi besar butir kristal austenit, tetapi dapat mempercepat perambatan retak fatik.
2. Proses anil yang dilakukan setelah pemanasan lokal dapat memperbesar butiran kristal austenit, meningkatkan keuletan bahan dan memperlambat terjadinya perambatan retak. Namun kekuatan bahan menurun cukup besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada pimpinan Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan dana untuk penelitian ini melalui DPP-UGM Tahun Anggaran 1995/1996.

DAFTAR PUSTAKA

- Fukuda, S., Watari, S. and Horikawa, K., 1979, An experimental study of effect on welding residual stress upon fatigue crack propagation based on observation of crack opening and closure, *Transaction of JWRI*, Vol. 8 No.2, pp. 105-111
- Irwin, G. R., 1957, Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate, *J. Applied Mechanics*, jilid 24.
- Jamasri, 1995, Faktor intensitas tegangan kritis pada retak yang terbentuk dari sambuanga las, *Laporan Penelitian DPP-UGM*.
- Maddox, S. J., 1991, *Fatigue strength of welded structures*, Abington Publishing, 2nd Ed., Cambridge, England.
- Miki, C., Tateishi, K., Fan, H. and Tanaka, M., 1993, Fatigue strengths of fillet-welded joints containing root discontinuities, *Int. Journal of fatigue*, pp.133-140.
- Paris, P.C., and Erdogan, F., 1963, A critical analysis of crack propagation laws, *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, No. 4, p. 528.
- Remmsnyder, H. S., 1978, Development and application of fatigue data for structural steel weldments, *Fatigue Testing of Weldments*, ASTM STP 648, pp. 3-21.
- Sandifer, J. P. and Bowie, G. E., 1978, Fatigue crack propagation in A537M steel, *Fatigue Testing of Weldments*, ASTM STP 648, pp. 185-196.
- Shin, C. S. and Hsu, S. H., 1993, On the mechanisms and behaviour of overload retardation in AISI 304 stainless steel, *Int. Journal of Fatigue*, Vol. 15 No. 3, pp. 181-192.
- Wojnowski, D., Kasapbasioglu, H. and Indacochea, J. E., 1994, Weldment evaluation of high pressure steam rotors, *Journal of Engineering for Industry*, Transactions of the ASME, Vol 116, pp. 429-434.